ALH84001 の巻き起こした科学的論争

宇宙科学研究所
山下 雅道

McKay ら (1996) による火星隕石の生命痕跡の可能性にかんする報告は、一つの科学的な論文であることをはるかに越えて、さまざまな反響を引き起こした。McKay らの報告は、地球以外の天体上での生命の存在の可能性を示唆し、我々の生命観に大きくかかわる発見であるかもしれない。このようななかで、圏外生物学は今後の宇宙活動を牽引する役割を与えられて舞台の中央でスポットライトをあび、その将来構想が論議されている。McKay らの論文に関する論争の紹介も、スペクトルの広さに応じてさまざまになされている。本特集でも土山 (1996) による隕石学・鉱物学からする解説と論争の紹介がある。一方、センセーショナルに関連分野の研究者の生態を紹介 (Begley and Rogers 1997) するものもあるが、論争の科学的な側面が十分に咀嚼されていなかったり、意図的ではないにせよ部分的な曲解さえなされている。ともあれ論争は進行中であり、その全体像を掴むのは困難である。科学的論争とは、観測や実験によって得られた結果をもとに何をどこまで結論できるかについて、科学的な文法にしたがって検討することであり、また、つぎに取り組むべき課題を摘出することである。このような観点からすれば、発見された個々の事実とそれから導かれる結論の科学の論理に基づいた検証はいうまでもなく、この隕石から推定される事象の全てを整合的に説明するために火星史の理解に変更がなされるかを検討しなければならない。あるいは、特定の場所での特異的な条件が示され、そのもとに生命の可能性を検証するといった、科学の細分野を越えた総合的な知の営為が求められている。ここでは、現在までの論争や発表された関連論文の概要を紹介することにより、まれにみるビビッドな論争に読者が参画して楽しめることを願うものである。

Johnson Space Centerに隣接する月惑星研究所がそのホームページの一部に火星隕石に関する情報をまとめており、本文も多くはこれによっている。最新情報は http://cass.jsc.nasa.gov/pub/lpi/meteorites/mars_meteorite.html にアクセスすることにより得られる。

多環芳香族炭化水素類 (PAH) は火星起源か

火星起源と推定される隕石中に火星由来の有機化合物 (多環芳香族炭化水素類: PAH) を発見したとするには、まずこれが地球上での汚染ではないことが認められないといけない。McKay ら (1996) は隕石の表面からの深さと PAH の濃度を測定し、表層近くでは濃度の低いこと、さらに Clemett and Zare (1996) は炭酸塩の存在部位に PAH が多く存在することを示している。地球上での汚染であるならば表層近くで逆に濃度が高いはずである。PAH の深さ方向への濃度依存性は地球大気突入時の隕石表層の加熱による PAH の消失による。また炭酸塩のある場所に PAH が局在することも、地球汚染の可能性を否定する根拠とされている。従って、南極の氷中にも PAH はあるという対論には十分答えている。複数の独立した項目の測定から、検出されている PAH が火星起源であることの正しさが補強されているように見える。火星に炭素質隕石が落下し、その成分がめぐりめぐって地球にもたらされたという仮説も唱えられているが、そのような事象の起こる確率の低さ以上に ALH84001 中での PAH の種類や存在形態までこれで説明するには無理があるだろう。

発見された PAH は生物起源か非生物起源か

PAH が生物起源であるのか非生物起源であるのかの論争は、生物的な有機物と認められるならば、もっとも説得力のある火星生命の証拠と

もなるだけに多彩である。

宇宙科学研究所がSFUにおいて実施した宇宙赤外線望遠鏡（奥田ほか 1997）は、中間赤外領域の観測（Onaka et al. 1996）で 3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 μm のバンド放射が銀河中に普遍に広く存在することを観測した。これらのバンドの発光源の有力な候補として PAH が挙げられている。またこのバンドの天空中での分布は、星間塵からの放射を波長 100 μm で観測して得られた分布とよい相関がある。つまり、PAH は星間塵の上ののっているか、あるいは星間塵を生成する星間空間で合成されている。地球上で多くの PAH が存在するばかりではなく、宇宙空間には多分非生物学的な起源の PAH が存在する。

ここで注意しておくべき点は、PAH は測定しやすい有機物であって、他の有機物に優越して宇宙空間や天体上に存在するかどうかはわからないことである。Zare らの使った光イオン化質量分析法は、他の化合物はイオン化出来ないほどの低エネルギーの紫外線で PAH の電子状態を励起してイオン化し PAH を選択的に検出している。IRTS での赤外観測でも、星からの光に比較的多く含まれる長波長の紫外光で PAH の電子状態の励起が容易になされ、振動状態へこのエネルギーが分子内遷移して赤外部で発光するという PAH の分光学的性質がこの化合物の観測を可能にしている。いずれにせよ、他の種類の有機分子が仮に同時に存在したとしても PAH が選択的に高感度で測定・観測される。

Anders (1996) は、1862 年に Berthelot がメタンからナフタレンを合成していることをあげ、非生物学的な PAH の合成の容易さの例としている。また McKay ら (1996) は、隕石 ALH84001 中に PAH でも 7 環以下の特定の化合物が多くあり、アルキル化した PAH の少ないことを生命起源の PAH であると主張した。これについても、Anders は次のような対論を述べている。炭素に富んだ系でグラファイトの合成が速度論的に阻害された条件が与えられ、C, H, O の存在比や圧力と温度といった条件が整うならば、出発物質の如何を問わず、変成条件下で平衡論的に決ま

る PAH 類の分布に従って PAH 類が生成されるのであり、特定の PAH があることが生物由来の証拠にはならない。

Anders (1996) が次にあげる論点は、PAH が炭酸塩の globule と空間的に共存することを生物的な活動とその遺骸に結びつけようとする事への疑問である。微細な構造をもつ炭酸塩が珪酸塩に比べてその表面によく有機物質を吸着し、また炭酸塩のもつ触媒能により有機化合物の芳香族化が促進された可能性にも言及している。

特定の物質を濃縮して局在させ空間的な構造を形成するのは、生命現象の得意とすることである。しかし、さまざまな機構により鉱脈がつくられるといった物理化学的機構によるエントロピー生産もあり、かつそれが生命の起源の一つの経路であるかもしれない。このような事情が、生物・非生物起源の論争を歯切れのわるいものにする。

PAH を分析した Clemett と Zare (1996) は、低質量の PAH は高温の無機的な過程で生じた可能性のあることは認めつつ、少量ではあるが見いだされている高質量の PAH は有機物由来とみられること、炭酸塩周辺に 2 種の PAH を選択的に配置させる非生物学的な過程を想像することが困難であると Anders に反論している。ただし、これは PAH が生物起源であることを強く立証するものではない。

有機物炭素の分布測定の空間的な分解能を上げる試みは、Flynn ら (1997) により行われている。化学種の同定や感度を犠牲にしながらも、X 線顕微鏡で 50nm ほどの空間分解能により化学結合形態の異なる炭素原子を識別しようという研究で、現在進行中である。

化石化の過程で保持される生命の情報

仮に PAH が生物起源であるとしても、PAH は生物が直接生産した化合物ではない。PAH は石炭に含まれる物質のモデル化合物とも類似する。植物を構成した物質の石炭化では、変成の時間や圧力、温度などの条件に従って、泥炭からグラファイトにいたるさまざまな物質へと変換さ

れる。

PAHが生物起源か否かの推定には、一般的に有機化合物が地質学的な条件でどのように変成されるかについての知識が求められる。映画「ジュラシックパーク」のごとくDNAが保存される条件の存否から、石炭化などで見られる変成過程で原物質の記憶を失う条件などについて知識が整理されていないと、見つかりもしない条件で生命探査を実行することになりかねない。例えば、石油や石炭の燃焼生成ガス中には燃焼温度を下げて空気中の窒素から生成する窒素酸化物の濃度を抑制しても、燃料中の化合物に含まれる窒素から窒素酸化物が生成する。その窒素は生物由来であることは確実であるにせよ、原初の化学的形態から石油や石炭のなかでどのようにどれほど変化しているのか。化石から引き出せる情報は、生物の遺骸が鉱物により置換されて保存された形態や、生物が作った鉱物とその同位体比以外にないのだろうか。仮にあるとしたら、どれほどの僥倖さがそろった場合だろうか。

Westallら(1997)は、南アフリカBarbertonに産する35億年前の微晶質の石英からなる岩石中の微化石をとりあげ、0.65-1.0 μm の棒状の微生物化石が、単独で存在したり、大きさの揃った細胞のクラスターを形作ったり、マット状に堆積したものとして見られることを示している。またこの化石は、鉱物質のグレインとして保存され、有機物は残存していないことを報告している。火星隕石に傾注される努力が、地球での始原的生命の探索にも向けられることが期待される。

同位体組成による生命活動の推定

地球上の生命の始まりを35億年から38億年にさかのぼらせるMojzsisら(1996)の発見は圏外生物学にとって画期的なものである。彼らが生命活動の証拠としたのは、生命活動の基盤である生化学的な反応の速度は炭素の同位体により異なり、生命活動由来の有機物では ^{13}C の存在比が周囲の無機炭素化合物での存在比と異

なるということである。水素の同位体Dでは質量比が2と大きく、生化学的反應に大きな影響があり、そもそも生命活動が阻害される。HとDにみられる顕著な効果ほどではないにせよ、関与する分子に含まれる炭素同位体の質量による分子の振動エネルギー準位やその他の物理化学的性質の差によっても、わずかではあるが生化学的な反応の速度は異なる。このような機構のおかげで、化石に残された炭素同位体比は生命活動のよい指標となる。

火星隕石では、炭素の放射性同位体 ^{14}C が測定され、宇宙線に曝露されていた時間、すなわち宇宙空間を漂っていた時間をこれから推定している。また ^{13}C の存在比が他の火星隕石と似るといったことが報告されている。しかし隕石中のPAHでの炭素同位体比は、PAHを選択的にイオン化するZareらの方法は必ずしも ^{13}C を検出できるほどに高感度ではなく、炭素の同位体比をもとにした生命活動の検討はなされていない。

同位体組成からする生成環境温度の推定

同位体の組成の測定は、対象全体のバルクとしての同位体比を質量分析して測定する手法と、微小な部位の同位体比をビーム照射によりイオン化して測定するという近年発達している手法とがある。後者のイオンマイクロプローブ法は、地球最古の生命を発見したMojzsisらも用いている方法で、高エネルギーのイオンビームを測定する物体上で細い径に絞って照射し、試料表面から物質を蒸発させながらイオン化して質量分析する。現在の技術では10から20 μm のビーム径で10 μm^3 の体積を分析することができ、炭素として20pgほどの量があればよい(Mojzsis, 1996)。同位体の分析では、 ^{13}C イオンの近傍にはHが一つ付加した ^{12}CH イオンのピークが出現するために、質量分析はこの2つのピークを分解できるだけの高い質量分解能で行う必要がある。この方法によれば、試料の光学顕微像をもとに同位体分析部位を選んで分析できることから、微視的な構造とそこでの同位体組成を細かく検討して多くの情報を引き出すことができる。

ALH84001の黄鉄鉱中のイオウの安定同位体 ^{34}S をShearerら(1996)は測定している。彼らは、黄鉄鉱の生成した温度が低いこと、および地球上で見られるイオウにからむ微生物の活動を特徴づける同位体比とは合致しないことの二つを導いている。しかし太陽系での値はともかくとして、火星でのイオウの同位体比に不確定さがあることもあり、火星生命痕跡の可能性に対しては、温度が低かったという推定以上には、強く肯定もしないしまた否定するものではない。ただし、黄鉄鉱の生成温度についても、高くてもよいとする説すらある(Greenwood et al. 1997)。

炭酸塩の酸素同位体比はValleyら(1997)がマイクロプローブ法により測定し、 320°C 以下で炭酸塩が生成したことを示している。炭酸塩のglobuleで ^{18}O が周囲より富化しており、さらに異なるglobuleで富化率が異なる。高温ではこのような同位体の分別がなされないことから、炭酸塩が生成した温度は高くなかったと推論している。中心から周辺に向かって ^{18}O の濃縮度が変化することは、低温で生成したことを示すものなのか(Saxton, 1997)、あるいは高温であっても閉じた系では同様の分布が生ずるのか、判断は分かれるところである。Leshin(1997)は、周囲のケイ酸塩との平衡から ^{18}O の富化を炭酸塩が高温で生成された証左としている。

液相の水はあったのか

ALH84001の炭酸塩の沈積とその後の部分的溶解は、水の存在を示すものであるとMacKayは主張する。一方、Scottら(1997)は、火星への彗星の衝突といった衝撃によりガラス状の部分とともに炭酸塩が融解、再凝固した時にglobuleが形成されたと解釈し、炭酸塩globuleの成因それ自体に別の可能性のあることを示した。はたして火星に水があり、またALH84001には液体の水が浸透したのだろうか。

地球型生命を成り立たせるには、特異的な物理・化学的性質をもつ水の存在は必須のものである。木星の衛星Europaは、液相の水が存在するという観測結果から、火星とともに生命探索

の対象として俄然注目されている。かつて火星の表面に液相の水があったことは、水が流れたり海であったような場所の跡などの地形的な特徴から認められる。これに加えて挙げられている証拠は次のようなものである。

Swindle and Kring (1997)は、より年代の新しい火星隕石Lafayetteで風化の産物である粘土鉱物を検討した。微小な風化鉱物試料の稀ガス同位体組成が、火星大気と同位体組成とは異なるという測定結果をもとに、液相の水があって溶解平衡の同位体効果によりこの分別が起こったとして、比較的後年まで液体の水が火星表層にあったと推定している。しかし、より古い隕石であるALH84001での変成の度合いは逆に低い。これについては、変成物が全火星的な過程を代表するものではなく、局所的な環境条件に支配されていると解釈している。微細な試料部位の同位体比から水温も推定できる技術が確立されることにより、今後さらに多くの試料が検討され、火星の熱史や局所的な環境条件の推移が明らかにされるだろうと期待される。

磁性と温度と宇宙放射線シールド

炭酸塩の構造が形成されたり、その周囲に種々の化合物が蓄積された時代の周囲の温度環境の推定は、生物活動の存在を推定するのに重要な項目となっている。周囲の鉱物自体の生成温度は高いのだが、その割れ目に炭酸塩が沈積し、さらにいえば生物活動が侵入したというのがMcKayらの基本的な仮定である。この過程が 110°C 以下の条件で進んだかが大きな設問としてある。生命現象を可能にする上限温度は、地球上の生命活動の上限温度から類推されているし、多くの議論は地球型の生命の枠から火星の生命の可能性を論じている。

Kirschvinkら(1997)は隕石中の局所的な残留磁場を計測して、炭酸塩globuleの周囲で等しく磁場の強い部分を見つけ、かつその磁場の方向が違うことを報告している。溶融鉱物が冷却したときに保存された惑星磁場の記憶が失われていないことから、磁場を保持した鉱物の析出生

成以降の温度は残留磁場の消失する 325℃以下に保持されたこと、および冷却後に割れて方向が不揃いとなったことを導いている。さらに、昔（40億年前）の火星に強い磁場が存在したこと、その効果として、現在の地球がそうであるように、惑星表面に入射する宇宙放射線を磁場により偏向して表面を高エネルギーの宇宙線からシールドしたと推定できる。さらに、磁場は太陽風による惑星大気の消失を妨げて厚い大気層を保持する効果があり、その結果、惑星表面での熱的な安定がはかられる。このように、強い磁場のおかげで、生命をはぐくむにはよい条件がかつての火星に存在した可能性を示唆するものとして、Kirschvinkらの報告は注目される。

生命の必要条件と十分条件

宇宙生物科学の中心的な命題は、地球型生命が地球に特殊なものなのか、あるいは宇宙に普遍で唯一可能な型の生命であるのかというものである。ALH84001 にまつわる科学的な論争で一つ奇異に見えるのは、いざ地球圏外で生命が存在するかもしれないとなると、とたんに地球型生命の類型や範囲に収まるかどうか生命か非生命の判断の一つにされることである。火星生命の研究で最も注目されるべきは、異なる原理の生命が宇宙にあるか（野田, 1996）という点である。Treiman (1997) は、地球型生命と類似であったりそれを外挿した生命体を前提とする議論に警鐘を鳴らしている。極地方や深い地中など地球上のさまざまな極限状況に生きる生物から火星生命を類推することは、一つの方向ではあるものの、地球と火星の化学、物理とその歴史がどれほど相同で、またどのように異なるのかを論議の出発点とすべきである。生命の始まりと進化の道筋に（異なる原理の生命を含め）生命を与える条件が火星にあったのだろうか。ALH84001 が生命の痕跡を含んでいるとするならば、この隕石に刻まれた火星史がこれまでの火星史の理解に変更を加えるような事実を含んでいるのか、あるいは隕石に示される生命を可能にする特異的な環境が火星史総体のなかで許

容される幅の中に収まるのか、これら二点を検討しなければならない。科学的論争は、実験で得られた事実をもってどこまで結論し、推論できるかを論争の対象とする。一つ一つの測定や観測の事実とそれから何を結論出来るかという点では、厳密な科学的論理が透徹されねばならない。一方、火星史にかかわる知識を総合し、生命が許容される環境条件が、過去あるいは現在に、火星全面とは言わずとも、局所的にはあれ存在するのかという論議が、将来の探査計画を立案するために求められる。生命を定義し、その存在の実証手段と判定基準を提案するといった努力は、科学的な想像力をどれほど闊達に遠くまでとどかせることが出来るかという基準に準拠しながら、ここに紹介した科学的論争とはひとつ区別された領域で進められる。

圏外生物学を中心に据えた惑星探査計画

宇宙活動は、これまでも大きな目的が設定され、その目的のもとに組織され、それぞれのうねりを作りながら展開されてきた。宇宙や物質・エネルギーの始まりと成り立ちに迫ろうとする天体物理学から、宇宙史の他方の端にある生命へと、宇宙科学の対象を大きく広げている。いま、圏外生物学は宇宙探査を牽引する旗頭として据えられ、その要求のもとに探査の計画を組織するという責務さえ負っている。これまでに知られている事実から、火星の生命に関する歴史の未確定な幅はどこにあり、何を今後につめていかないといけないか、生命探査場所を決めるのに、どんな情報が必要であるのかといった点を明らかにする作業を進める。

宇宙科学研究所が進めている小惑星からのサンプルリターン計画は、地球以外の天体から月について二番目に物質を人類が手にしようとする計画である。探査のターゲットとされている小惑星ネレウスは炭素質コンドライトと同様の物質から作られており、惑星間空間での生命原物質の存在様式をつぶさに知ることが出来る。送り出す宇宙機の逆検疫や、採集試料を汚染なく分析する技術を適用すべきミッションでもあ

り、圏外生物学探査が日本で大きなステップを踏み出すものとして注目される。

参考文献

- Anders E.; Science, 274, 2119-2121 (1996).
- Begley, S. and A. Rogers; War of the Worlds, News Week, 48-50, (February 1997).
- Clemett, S.J. and R.N. Zare; Science, 274, 2122-2123 (1996).
- Flynn G. J., Keller L. P., Kirz J., Wirick S., Bajt S., and Chapman H. N. ; Carbon mapping and carbon-XANES measurements on carbonate globules in ALH 84001, Lunar Planet. Sci. XXVIII (1997).
- Greenwood J. P., Riciputi L. R., and McSween H. Y. Jr. ; Sulfur isotopic variations in sulfides from shergottites and ALH 84001 determined by ion microprobe: No evidence for life on Mars, Lunar Planet. Sci. XXVIII (1997).
- Kirschvink, J. L., Maine A. T., and Vali H.; Paleomagnetic evidence of a low-temperature origin of carbonate in the martian meteorite ALH 84001. Science, 275, 1629-1633 (1997).
- Leshin L. A., McKeegan K. D., and Harvey R. P.; Oxygen isotopic constraints on the genesis of carbonates from martian meteorite ALH 84001, Lunar Planet. Sci. XXVIII (1997).
- McKay D. S., Gibson E. K. Jr., Thomas-Keprta K. L., Vali H., Romanek C. S., Clemett S. J., Chillier X. D. F., Maechling C. R., and Zare R. N. ; Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in martian meteorite ALH 84001. Science, 273, 924-930 (1996).
- Mojzsis, S.J., G. Arrhenius, K.D. McKeegan, T.M. Harrison, A.P. Nutman and C.R.L. Friend ; Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago, Nature, 384 55-59 (1996).
- 野田春彦; 火星に生命はいるか, 宇宙生物科学, 10, 259-261 (1996).
- 奥田治之ほか; IRTS (宇宙赤外線望遠鏡), 宇宙研報告 特集 36 号、6-18 (1997).
- Onaka, T., I. Yamamura, T. Tanabe, T.L. Roellig, and L. Yuen; Detection of the Mid-Infrared Unidentified Bands in the Diffuse Galactic Emission by IRTS, Publ. Astron. Soc. Jpn, 48 L59-L63 (1996).
- Saxton J. M., Lyon I. C., and Turner G.; Oxygen isotope ratio zoning in ALH 84001 carbonates, Early Mars Conference (April, 1997).
- Scott E.R.D., Yaaguchi A., and Krot A.N. ; Petrological evidence for shock melting of carbonates in the martian meteorite ALH84001, Nature 387, 366-379 (1997).
- Shearer C. K., Layne G. D., Papike J. J., and Spilde M. N. ; Sulfur isotope systematics in alteration assemblages in martian meteorite ALH 84001, Geochim. Cosmochim. Acta, 60, 2921-2926 (1996).
- Swindle T. D. and Kring D. A. Studies of weathering products in the Lafayette meteorite: Implications for the distribution of water on both early and recent Mars, Early Mars Conference (April, 1997).
- Treiman A. H. ; Thinking about life on Mars: Dangers and visions, Lunar Planet. Sci. XXVIII (1997).
- 土山明; 火星生命発見? の隕石学・鉱物学, 宇宙生物科学, 10, 262-269 (1996).
- Valley J.W., Eiler J.M., Graham C.M., Gibson E.K. Jr., Romanek C.S., and Stolper E.M. ; Low-temperature carbonate concretions in the martian meteorite ALH 84001: Evidence from stable isotopes and mineralogy. Science, 275, 1633-1638 (1997).
- Westall F., de Wit M. J., and Dann J.; What do fossil bacteria look like? Examples of 3.5-billion-year old mineral bacteria and the search for evidence of life in extraterrestrial rocks, Lunar Planet. Sci. XXVIII (1997).

やました まさみち
〒229 相模原市由野台 3-1-1
宇宙科学研究所
yamashita@surc.isas.ac.jp

Pros and cons for Martian life : Scientific debate on ALH84001

Masamichi Yamashita

Institute of Space and Astronautical Science
Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229, Japan

Scientific debate related to possible martian life is summarized in this article. Even there is no firm conclusion yet to convince the existance of life on Mars, intensive studies on the meteorite ALH84001 have invoked many valuable findings.

Key words: Exobiology, Mars, Meteorite.